

日本人の健康を支える水産資源(第16回) : 地球温暖化が海洋環境に与える影響(後編)

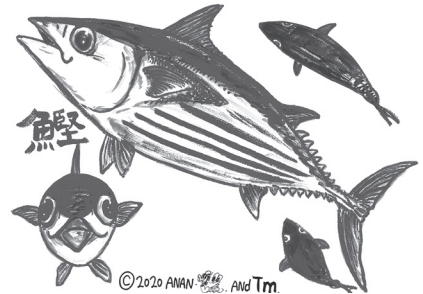
著者	溝端 浩平
雑誌名	食品と容器
巻	61
号	3
ページ	150-160
発行年	2020-03
権利	(c) 2020 缶詰技術研究会. It is posted here for your personal use. To cite/redistribute/reproduce this work, the Publisher's version in http://kangiken.net/backnumber/6103_bknum.pdf should be used, and obtain permission from Publishers, if required.
URL	http://id.nii.ac.jp/1342/00002048/

地球温暖化が海洋環境に与える影響

後 編

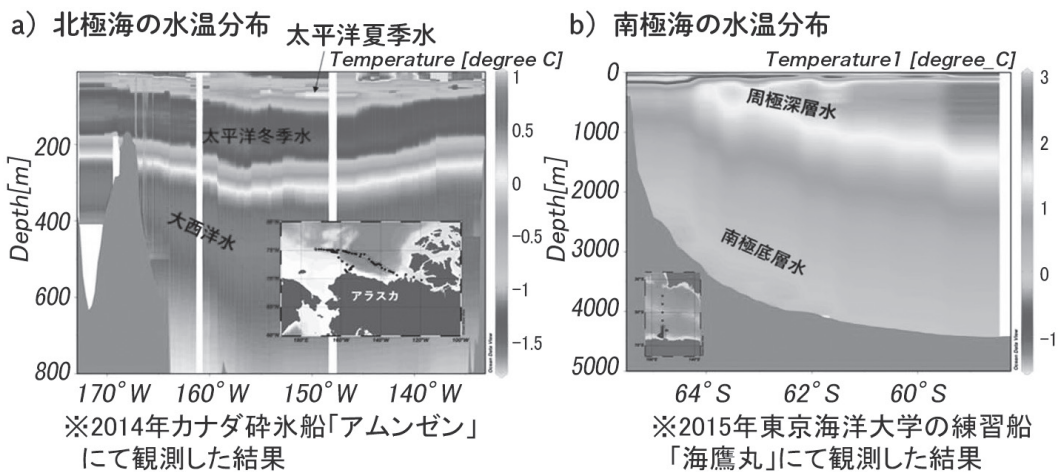


みぞはた・こうへい
宇宙航空研究開発機構地球環境変動観測ミッション AMSR
後継機センサチーム委員会委員，国立極地研究所南極観測審議委員会気水圏専門部会委員，日本海洋学会 Journal of Oceanography 編集委員（衛星リモートセンシング担当）を務める。専門は海洋物理学，衛星リモートセンシング，極域海洋学。



溝端 浩平

さかなクンイラストより

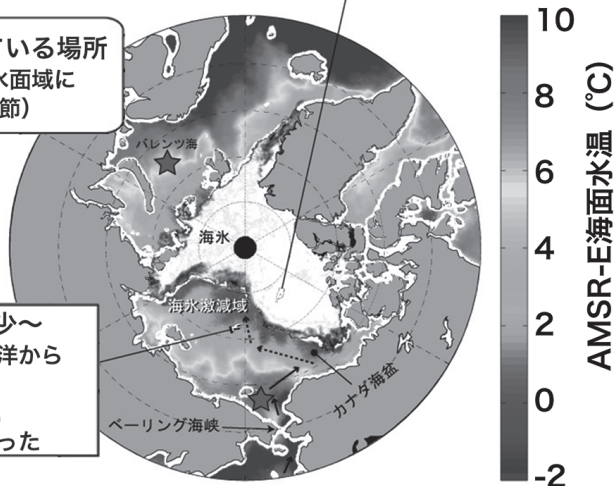


第6図 北極海 (a) と南極海 (b) の水温鉛直断面図 (カラー写真を HP に掲載 C006)

～海水－海洋アルベドフィードバックによる海氷減少～
海氷が動きやすくなって，日射が海洋に吸収されやすくなった

★気象への影響が示されている場所
冬季でも海氷が少なく，開放水面域における熱放出がある (2.3.2節)

～海洋温暖化による海氷減少～
ベーリング海峡を越えて，太平洋からやってきた太平洋夏季水が，表層混合層を暖めることにより，冬季の海氷が形成されにくくなった



第7図 北極海の家氷減少にかかわるプロセス (カラー写真を HP に掲載 C000)

ここから紹介する北極海の海水減少に関わるプロセスについては**第7図**に簡単にまとめておく。

太平洋側北極海における海水減少については、2つの海洋に関わるプロセスが挙げられている。1つ目は“海水—海洋アルベドフィードバック”である。解像度の粗い衛星画像では、一見して北極海は完全に海水に覆われているように見えるが、海水融解期においては、海水と海水の間にすき間、つまり海面が露出する開放水面域が見られる。このすき間で日射が吸収されると、すき間の海洋が暖められて海水の底面と側面を融解していく。すると、このすき間領域は拡大する。白い海水は日射の8割を反射する（反射率、アルベドが高い）が、海洋は日射の9割を吸収する（アルベドが低い）。したがって、拡大したすき間領域は、さらに日射を吸収し、海水融解が促進される。これをアイスアルベドフィードバックと呼ぶ。国立極地研究所の柏瀬氏らは衛星データ解析により、融解初期に海水の発散量（海水が広がる方向に動く、端的に言えば、バラバラになること）が大きいと、このアイスアルベドフィードバックが有効に働くこと、そして北極海では2000年以降、越冬を繰り返して成長した分厚い多年氷が減って、海水の発散量が2倍程度になったことを近年明らかにしている（Kashiwase et al., 2017）。彼らはこれまでの“アイスアルベドフィードバック”に“海水の発散量”の概念も含め、一連のプロセスを海水—海洋アルベドフィードバックと呼んでいる。

2つ目のプロセスは海洋の温暖化である。まず太平洋側北極海には、“玄関口”のベーリング海峡から暖かい太平洋由来の水、太平洋夏季水（**第6図**）が流入する。太平洋夏季水は7月にベーリング海峡を通過し、アラスカ沿岸を右手に見て流れ、秋にバロー峡谷に到達する。通常は浅い方を右手に見て、アラスカ沿岸に沿って東へ流れるように思えるが、カナダ海盆にはボーフォート循環と呼ばれる時計回りの流れが存在する。太平洋夏季水はこのボーフォート循環によって、冬季に海水激減域であるチャクチボーダーランドに到達する。

2006年当時、海洋研究開発機構にいた島田氏ら（現、東京海洋大学）は、この太平洋夏季水によってチャクチボーダーランド周辺の海洋貯熱量が増加していることから、夏季の海水融解ではなく、海洋温暖化による冬季の海水形成量の減少が、海水減少の引き金になっていると示した（Shimada et al., 2006）。

上述した研究結果からは、地球温暖化が直接的に海水減少を引き起こしているとは思えないかもしれない。しかしながら、温暖化に伴う海水融解はアイスアルベドフィードバックの引き金になり得るであろうし、温暖化による海洋貯熱量（特に太平洋における）の増加は、太平洋夏季水に伴う北極海への熱輸送量を増大させるであろう。また、冬季の北極海の海流は“静かなもの”と思われてきたが、最近では海水が減少しており動きやすくなっている。筆者らは衛星データと数値モデルを用いて、海水に覆われている北極海の海洋循環場とその変動を明らかにし、その結果、冬季の海水運動の強化に即座に応答してボーフォート循環が強化されること（暖かい太平洋夏季水を運ぶ量が増加すること）を示した（Mizobata et al., 2016）。したがって過去に比べて現在の北極海は、大気場の変動をすぐに反映して変動し、太平洋夏季水を運びやすい。また、筆者らは現場観測から2007年の時点でチャクチ海の沿岸域では10℃を超える暖水の流入を確認しており、その上流にあるベーリング海峡から北極海への海洋熱の流入が2004年以降、それまでの約2倍に増加していることを衛星データから明らかにした（Mizobata et al., 2010）。これは流量の増加だけでなく、太平洋水の温暖化にも要因がある。この温暖な太平洋水が北極海の沿岸域に到達して海水を減少させ、太平洋側北極海の海水が動きやすくなるのである。つまり、地球温暖化は様々な過程を経て、自然の仕組みに内在する「海水減少に関する一連のプロセス」を加速させているといえるだろう。

2-3-2. 気象への影響

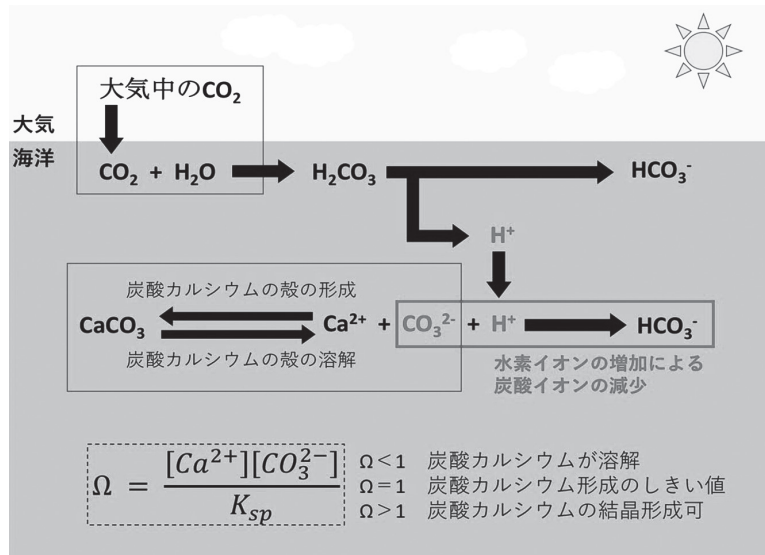
北極海の海水減少は、莫大な熱の大気への放出

を意味する。例えば、冬季の大気温度は -50°C を下回るが、海洋はどれだけ冷えても -1.8°C である。それ以上冷やされれば、結氷し、海水が海を覆う。一方で何らかの要因で海水域に海面が露出する開放水面域が形成されると、大気と海洋との温度差によって海洋から大気へ莫大な熱放出が起きる。この莫大な熱の放出は、低気圧の移動経路を変え、北極を覆う寒気の分布を変える。猪上氏らによると大西洋側のバレンツ海で海水が多い年はバレンツ海周辺から低気圧がシベリア北部沿岸域に沿うように東へ移動するが、海水が少ない年は低気圧が北極海上空を通るようになる (Inoue et al., 2012)。海水が少ない年は、シベリア高気圧がより北極の方へ張り出すことが可能になる。その結果、シベリア高気圧は北極由来の冷たい寒気を日本へ運べるようになる。2011/2012年の冬に記録した豪雪はこの北極の温暖化と大陸の寒冷化パターンで説明されている。また、近年ではチャクチ海の海水減少も着目されている。ここ最近の冬季におけるチャクチ海の海水は少なく、開放水面が広がっている。立花氏ら三重大大学のグループは、チャクチ海の海水激減に伴う海水の穴を“Warm hole”と名付け、この Warm hole がベーリング海峡付近の低気圧を強化することで、暖かく湿った大気の北極への流入を促進し、その結果として偏

西風の経路が歪められ、北極点近くまで偏西風が侵入したことを示している (Tachibana et al., 2019)。偏西風の侵入した領域は通常、北極を覆う寒気が存在する場所である。したがって、偏西風が侵入した分と同等の質量の寒気はどこかに押しやられる。どうなったかということ寒気は東アジアと北米へ押し出され、2017/2018年に両地域に寒波をもたらしたとされている。このように北極海における海水の減少は、北半球の気象に目に見える形で影響を及ぼしている。

2-3-3. 海洋生態系への影響

地球温暖化の影響は、北極海の海洋酸性化をももたらす。一般的には、大気中に放出された CO_2 を海洋が吸収すると、海洋の水素イオン指数 pH が通常の約 8.1 程度 (弱アルカリ性) から下がる。海洋中の CO_2 が増えると、結果的に水素イオンは増え、炭酸イオンは減少するからである (第 8 図)。海洋の生物、特にサングや貝などの炭酸カルシウムの殻をもつ生物にとっては、「酸性化する」ことで「炭酸イオンが減少し、炭酸カルシウムの殻を作ることができない、もしくは溶解する」ということが問題となる。ただ、これは通常の海洋の話で、北極海では地球温暖化が同じ問題を助長する。海洋において、炭酸カルシウムの結晶を形成できるかどうかの指標に、“炭酸カルシウム飽和度 Ω (オメガ)” というものがある。 Ω の分子はカルシウムイオンと炭酸イオンの積で、分母は溶解度積と呼ばれている (第 8 図)。この Ω が 1 より小さくなれば、炭酸カルシウムは溶解する、つまり殻は形成できない。上述したように、海洋酸性化では炭酸イオンが減少するが、北極海には CO_2 吸収以外にも炭酸イオンの減少を引き起こす要因がある。それが、前節の海水減少である。海水減少、すなわち海洋への淡水放出により、海洋が希釈されるため炭酸イオンは結果的に減少する。つまり $\Omega < 1$ となりやすくなる。川合氏らは現場観測の結果から、北極海のカナ



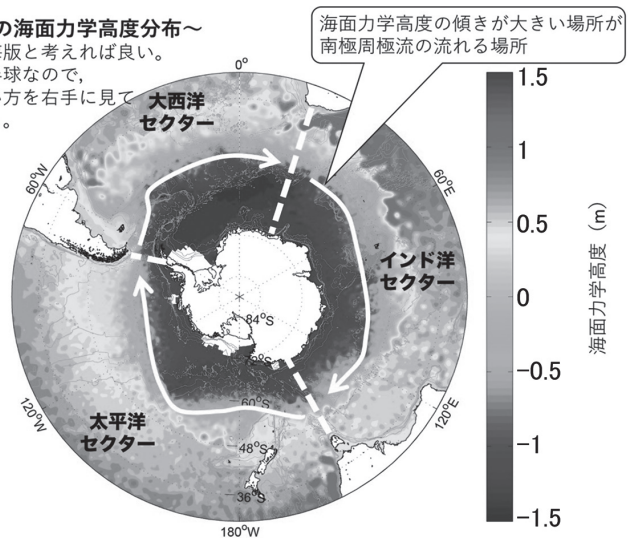
第 8 図 海洋酸性化の仕組み (カラー写真を HP に掲載 C000)

ダ海盆において海水激減前の1997年と以後の2008年で比較した結果、海水融解水の多い海域＝淡水量増加域で、炭酸カルシウム飽和度 Ω が1以下の海域が見られたことを報告している(Yamamoto-Kawai et al., 2009)。北極海には翼足類でリマシナ・ヘリシナ(和名はミジンウキマイマイ)という、見た目はカタツムリだが炭酸カルシウムの殻をもち、同じ翼足類のクリオネのように水中を羽ばたいている生物がいる。リマシナ・ヘリシナはクリオネの大好物であるだけでなく、鮭やニシンなどの餌にもなっている。したがって、地球温暖化に伴って、この小さな生物が殻を作りにくくなり、生物量が減少すると彼らに依存している海洋生態系にも悪影響が出るということになる。また、海洋研究開発機構の藤原氏は、海水融解時期が早まると、植物プランクトンのサイズが春に大型化し、夏には小型化することや、夏の開放水面域の長期化で水温環境が変わり、植物プランクトンの群集構造を変え、ひいては食物網や生物地球化学的循環(例えば炭素循環など)に影響を与える可能性があることを示している(Fujiwara et al., 2011; Fujiwara et al., 2014)。

2-4. 南極海への影響

南極海は極めて広大な海洋で、太平洋セクター・インド洋セクター・大西洋セクターと主に3つに分けられる。南極海には南極周極流と呼ばれる世界最大の海流が南極を一周するように流れており、毎秒1.3億トンの水を輸送している(第9図)。一方、南極大陸付近には大陸棚斜面に沿って西向きに流れるスロープカレントが存在する。南極海には、このようなダイナミックな流れ以外に、気候を考える上で重要な循環の出発点が存在し、世界の研究者が着目している。その循環とは深層大循環である(第10図)。この深層大循環に

～南極海の海面力学高度分布～
天気図の海版と考えれば良い。
ただし南半球なので、
高度が低い方を右手に見て
流れがある。

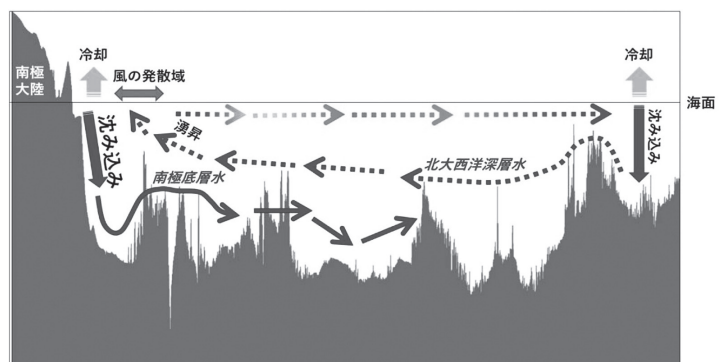


第9図 南極海の海面力学高度分布と南極周極流
(カラー写真をHPに掲載C000)

より、冷たい流体が熱帯域へ、暖かい流体が極域へ向かう。ある場所が熱くなりすぎず、冷たくなりすぎず、現在の気候システムが安定している理由である。深層大循環の駆動力は大きく分けて2つあり、「海洋中による混合で深層水が得る浮力」と2.2節で触れた「南極大陸で形成される世界で一番重い水、高密度陸棚水の沈み込む力」である。ここでは、地球温暖化の南極海への影響について、この深層大循環にまつわる話から紹介する。

2-4-1. 深層大循環の弱化と気候への影響

2.2節で触れたように深層大循環の駆動力である高密度陸棚水は、海水の真水部分が凍ってできた残りの濃縮された海水である。この高密度陸



第10図 深層大循環の模式図
(カラー写真をHPに掲載C000)

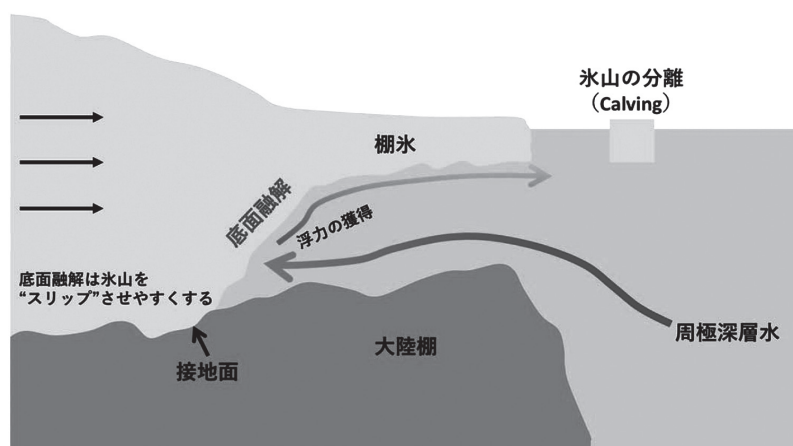
棚氷は、周囲より重い沈み込んでいく。ただし、そのままでは海底までは沈み込めない。実際には大陸棚から流れ出た際に、はるか大西洋からやってきた“周極深層水”と呼ばれる暖かくしょっぱい水と混合し、さらに密度が重くなり、“南極底層水”となって沈み込んでいく。東京海洋大学の北出氏は現場観測結果から、高密度陸棚氷と周極深層水が1：1で混合し、南極底層水が形成されていることを明らかにしている (Kitade et al., 2014)。ただし、この南極底層水に関しては現在、変化の兆しが報告されている。IPCC の第5次報告書では、世界の海に比べて、深度1000m 以深で南極海は昇温していることを報告している。また Purkey and Johnson (2013) は、世界の観測結果をまとめ、南極海の南極底層水が存在する層 (深度2000m, 4000m) で昇温化・低塩化、つまり低密度化していることを明らかにしている。彼らは、この低塩化のおよそ50%は南極大陸上の氷床融解による淡水量増加で説明できるとしている。つまり、冬の冷却に伴う海水形成時に、濃縮される海水の塩分がそもそも低くなっているということを暗に示している。これらから、地球温暖化に伴う氷床融解により、高密度陸棚氷が軽くなることで、深層大循環を駆動する力が弱くなることが推察される。映画「デイ・アフター・トゥモロー」

のような世界がすぐに訪れるとはいわないが、将来的に起こる可能性があるということになる。ちなみに、南極底層水の低密度化の要因については、残り50%はよくわかっていない状況にある。しかし、その疑問を解く鍵は「南極底層水の昇温化」が握っているのかもしれない。南極底層水の起源である高密度陸棚氷は低塩化しているが、基本的には毎年変わらず冬の冷たい大気にさらされた結果として形成されるため、その時点ではかならず結氷水温近く (約 -1.8°C) になる。そうであるならば、南極底層水が昇温する理由は、沈み込んだ後の海洋中での変質に求めるしかない。そして、海洋内部での熱源としては 1°C 前後の周極深層水が最有力候補である。この疑問を解消するには、海洋内部における高密度陸棚氷と周極深層水との混合具合、もともとの周極深層水の温度変化などをつぶさに見ていく必要があるだろう。

2-4-2. 南極氷床融解と海面水位上昇

前節の最後で触れた周極深層水の挙動は、全く異なる側面で現在注目されている。それが、暖かい周極深層水による南極大陸に存在する棚氷 (南極氷床の末端部で海洋に接している部分) の底面融解である (第11図)。棚氷の質量消失には、「カービング (氷山の分離)」があるが、多くの場所でカービングより、底面融解が寄与していると報告

されている (Rignot et al., 2013)。この底面融解については、莫大な熱を輸送する南極周極流が大陸側へ近づく西南極 (南極を宇宙から見たときの西経領域、特にアムンゼン海やベーリングハウゼン海) で多く観測され、議論されていた。一方、東南極は西南極に比べて莫大な氷、つまり氷床が存在しているが、つい最近までは氷床量はそれほど減少しないだろうといわれてきた。しかしながら、近年のアメリカ航空宇宙局による発表は衝撃を与えた。それは東経116度付近にあるトッテン棚氷の流動速度が大きくなっている



第11図 南極海周辺の大陸棚で起きている棚氷の消耗プロセス (カラー写真を HP に掲載 C000)

(<https://climate.nasa.gov/news/2832/more-glaciers-in-east-antarctica-are-waking-up/>), というものである。そして、このトッテン棚氷の消失についても周極深層水による底面融解の寄与が大きいとされている。なお、トッテン棚氷の消失は海面水位上昇という全人類が直面する課題においても重要な意味をもつ。トッテン棚氷が仮に消失すると、その背後にある莫大な氷床も海洋にさらされる。この氷床の融解は全球の海面を4m引き上げる。西南極の氷床融解も同程度の影響をもつ。

周極深層水は大西洋由来の古い水かつおよそ深度300m以深に存在するため、地球温暖化がこの水を直接的に昇温させることは考えにくい。しかし、南極における棚氷融解は2000年代になって目立つようになってきている。南極周極流が接近し莫大な熱輸送がある西南極だけでなく、元来冷たい海とされてきた東南極でもこのタイミングで底面融解が報告されるようになってきたということから、地球温暖化が何らかの形でこの氷床底面融解に影響していることが示唆される。例えば、海水減少と表裏一体である高密度陸棚水の減少により、沖合の周極深層水が入りやすくなるメカニズムがあるのかもしれない。この詳細については今後の課題である。なお、ついに融解が加速し始めたトッテン棚氷周辺海域では、南極地域観測事業の一貫として、砕氷艦「しらせ」や東京海洋大学附属練習船「海鷹丸」の観測が行われており、筆者を含む日本の研究者グループは世界に先駆けて、トッテン棚氷の融解プロセスやその海洋への影響の解明に向かって邁進しているところである。

2-4-3. 人為起源 CO₂の吸収力

南極海は深層循環や氷以外に、CO₂の吸収海域として知られ、人為起源 CO₂の約40%を吸収していると見積もられている (Khaliwal et al., 2009)。この理由は混合層深度と2.4.1節で述べた水の沈み込みである。海洋と大気が触れる場所は基本的には表面だけである。混合層深度とは表面で大気と接した水が潜れる深度と言い換えられる。一般的な海洋はせいぜい100m までだが、南

極海周辺は200m 前後である。それだけ大気と触れる水が多いということになる。これに加えて、大陸棚上で大気に冷やされ、大気中の物質を多く含んだ水は、高密度水から南極底層水へと変質し、海底まで運ばれる。いわば、南極海は大気から海洋底層までが通気する“換気口”なのである。大気から海洋底層へ隔離された CO₂は、数百年スケールで大気に戻ることはない、というのが現状の理解である。しかし、すでに述べたように南極海の深い層は低密度化している。ここからは推論になるが、軽くなった南極底層水は本来到達するはずの底層まで沈み込めなくなる割合が高くなっていると考えられる。さて、底層まで到達できず、中層に達した CO₂はどうなると考えられるか？実は、南極海には中層から表層までの湧昇流が存在する (第10図)。もし CO₂が中層の湧昇流に取り込まれると、せっかく隔離された CO₂が表層へ戻るかもしれない。つまり、地球温暖化で50%が説明される南極底層水の低密度化が、南極海における CO₂吸収力の低下を招き、地球温暖化の加速に寄与するかもしれないということになる。もちろんこれは、あくまで推論であるが、異なる CO₂の吸収履歴をもつ水塊間の混合が活発に行われるので、実際には海洋中の人為起源 CO₂の見積もりには大きな不確実性が存在することも確かである (DeVries, 2014)。南極底層水の低密度化を示す観測事実から考えられる「人為起源 CO₂の吸収力低下シナリオ」についても、今後その詳細を調査する必要があるであろう。

3. 筆者が極域海洋の研究をはじめたきっかけ

3-1. 極域とは無縁の学生時代

猛暑で道路上に陽炎(蜃気楼のようなゆらめき)が見える大阪から出ていきたくて、私は北海道大学水産学部に入學した。水産学部の願書を入手した際に、パンフレットには地球環境観測衛星による海面水温画像があったことは今でも鮮明に覚えている。物理が得意だったこともあって、海洋気

象学講座に行こうと思いつつも、受験前の衛星画像が頭から離れなかった。最終的に4年生になる直前、同大学の衛星資源計測学講座の門を叩いていた。研究室の選択は人生を大きく左右する。海洋気象学を選んでいたら、確実に極域研究はしていないだろうし、そもそも研究者になっていたかどうか定かではない。これが1つ目のターニングポイントであった。しかし、学部4年生の頃は研究者になろうとは全く思っていなかった。就職活動をして某ビール会社に行くつもりで最終面接まで行ったのはいい思い出である。結局、就職活動はすべて失敗に終わり、自分が将来について何もビジョンを持ち合わせていないことを痛感させられ、行く先がなかったので大学院に進むことになった。完全に後ろ向きの進学である。そんなこともあって、「研究者になりたい」という4年生が現れると「すごいな、よくそこまで考えられるな」と思う反面、「ほんまでっか!？」とも思ってしまう。

さて、講座に配属されて4年生の頃に行っていた研究テーマはなにかというと、極域とは全く無縁の「スルメイカ漁場分布と水温フロントとの関係」であった。米国大気海洋局の軍事気象衛星DMSPによる夜間可視画像との衛星NOAAによる海面水温を用いて、海上の光(=スルメイカ漁船分布⇒スルメイカ漁場とみなす)と、海面水温分布との関係を調べていた。このとき、水産海洋学に初めて真面目に触れるのであるが、これが極めて困難な課題であることに気づく。まず、漁場は「経済的に漁業として成り立つだけの魚を漁獲できる海域」であるが、漁船の分布・移動が“船長”の意思を反映していることから、安易に「光の分布=漁場」とみなせないという問題点に直面する。また、漁場はスルメイカの好適水温に形成されるはずだが、この水温帯の海域が形成される理由を説明するには、海洋循環や大気場、いわゆる地球物理学を理解する必要がある。困っていた私はコーヒーを入れ、先輩と一緒に飲みながら議論を繰り返すことになった。当時、衛星資源計測学講座

ではゼミ以外にも、ざつくばらんに分野を超えて学生だけで議論をし、本当に困ると先生を呼ぶ、ということをして繰り返していた。当時講座には「衛星データの検証・校正」「水産海洋学」の2グループしかなかったのだが、この議論を経て私は海洋物理学の方へ走ろうと思うに至った。魚だけでなく、海洋生態系を包括的に理解する上で、海洋物理学は避けては通れず、もともと物理が好きだったからだ。これが2つ目のターニングポイントである。ちなみに、この講座から海洋物理学に走ったのは後にも先にも私だけだったようである。

3-2. 対象海域が北海道周辺から

ベーリング海に移った大学院生時代

大学院に入った頃、研究テーマを考えあぐねた結果、「鮭の回遊経路を衛星観測データから明らかにする」という壮大な研究を思いついた。衛星観測は海面の情報のみだが、既存の現場観測データと衛星観測を結びつけ、どこの海域で鮭にとっての好適水温帯が水平方向・深度方向に広がっているかをあぶり出す、というテーマで漠然としたものではあったが、修士1年の割にはそれなりに考えていたと思う。今の自分が衛星観測データから海面下の海流をあぶり出しているのだから。当時の師匠である齊藤誠一教授や先輩の前で発表したら、「アイデアはいいけど、実現可能性が低い」と一蹴されてしまった。再び、考える人になっていた頃、齊藤教授が宇宙開発事業団(NASDA、現在は宇宙航空研究開発機構、JAXA)とはじめて共同研究について話があるとおっしゃる。開口一番、「アラスカ大学の国際北極研究センター(IARC)に行くか？」これが3つ目のターニングポイントであった。

行き先がハワイ大学の国際太平洋研究所(IPRC)であれば、やはり極域の研究はしていなかったであろう。私は直感から齊藤教授に2つ返事で「行きます」と答えた。IARCとIPRCは、1997年の「地球的展望に立った協力のための日米共同協議事項(コモン・アジェンダ)」に関して当時の橋本総理とゴア米副大統領との間で地球変動とその予

測分野における研究を推進することが重要であると合意があつて、1999年にアラスカ大学とハワイ大学に設立された。そのような背景は全く知らず、英語も話せないまま、アラスカ大学に5カ月滞在することになった。IARCにはNASDAの研究施設IARC-NASDA情報システムがあり、私は学生にもかかわらずブースと高速サーバーを与えてもらった。食費以外はプロジェクトもちなので、タダで帰るわけにはいかない。IARCや隣のアラスカ大学水産海洋学部には著名な海洋物理・海洋生物の研究者がいたので、訪問して筆談を交えながら共同研究を進めた。IARCにいた頃は時間が極めてゆっくり流れていたため、当時日本海洋学会でもほんの数人しか触れていなかったTOPEX/Poseidonという衛星海面高度計のデータ処理・解析手法を独学で得ることができた。ただ、まだ極域には手を出していなかった。実際には「海水」が大嫌いであつた。なぜなら、私の使う衛星データ、例えば海面水温は海水のせいで「欠損値扱い」となるからである。この頃の研究は、ベーリング海の陸棚斜面における海洋の中規模渦と海洋基礎生産量との関係を現場観測・衛星観測・数値モデルの3手法から攻めるというものであつた。北極海の南に位置するベーリング海の陸棚斜面域には海水がない。この海域では渦の周辺でなぜか動植物プランクトンもスケトウダラも多いが理由がわかっていなかった。そこで、渦に関しては海洋物理学の側面から明らかにできるのではと思ったことが研究をはじめたきっかけであつた。結局、修士課程から博士課程の間に、IARCには2度滞在し（計10カ月）、数値モデルについてはIARCのJia Wang博士に師事した。この時点でも私は極域をやるつもりはなかった。実はNOAAのPacific Marine Environmental Laboratory (PMEL, 太平洋海洋環境研究所)に行つて、ベーリング海の研究をするつもりだったので、投稿論文の査読者にはかならずPMELの研究者を指名していたのだ。ただ、そう簡単にポストがあるわけでもなく、困っていたときにJia Wang博士か

らポスドクとして来ないかと誘いがあつた。これが4つ目かつ最大のターニングポイントである。

3-3. ついに極域海洋学に足を踏み

入れることになったポスドク時代

2005年9月、IARCの北極モデリンググループの一員としての生活がはじまつた。海水が嫌いだった私が担当することになったのは、「北極海を対象にした海水-海洋結合モデルの改良」だつた。もう海水からは逃れられない。イチから海水のことを調べ、数値モデルの改良に従事した。数値モデルからは沿岸域の定着氷の形成要因や、北極海内部の海水減少の要因について多くのことを示すことができた。一方で、疑問も湧いてくる。当時の数値モデルでは、北極海の夏における海水分布を正確には再現できていない部分があつた。ここは現場観測屋や衛星データ解析屋と数値モデル開発者とで見解が分かれるところではあるが、私にはやはり完全な再現ができていたとは思えなかつたのである。数値モデルの再現結果は、初期条件や境界条件を変えることで一変する。また、積分する運動方程式や格子サイズなどによって、実際の北極海で起きている現象を再現しきれていない場合もある。そうであるならば、水産学部で泥臭く船に乗ってきたのだから、もう一度現場の海に戻り、何がわかっていないのか調べてみるということも1つの手であろうと考えていた。そして、IARCに着任して1年が経とうとする頃、当時の海洋研究開発機構の北極グループにいた島田氏（現東京海洋大学）により、現場観測研究に基づいて太平洋起源の暖水が海水減少をもたらしているという報告がなされた。当時、海水が激減している太平洋側北極海で現場観測を精力的に実施していたのは、海洋研究開発機構、カナダの海洋科学研究所、ワシントン大学、ウッズホール研究所であつた。北極モデリンググループの一員として成果をまともに出したなら、この4機関のどこかに行ければと漠然と考え始めた。結局、日本学術振興会の特別研究員PDとして東京海洋大学に異動し、以降は衛星観測と現場観測を主軸にした北

極海研究を進めるようになった。

3-4. 「氷」があるからこそ、面白い

北極海と南極海

運良く2010年に東京海洋大学で助教となり、研究を進めるうちに南極海研究に従事している方々からも一緒に研究をしませんかというお誘いをいただくようになった。振り返れば、スルメイカ⇒ベーリング海の渦⇒北極海の水・海洋循環と紆余曲折を経てきたが、耳学問も相まって今の研究にはこれまでの経験が非常に役立っている。現在は北極海と南極海双方で、これまでデータがなかった海水域の海洋循環場を衛星データ解析から明らかにするという研究を行っている。データがなかった理由は、衛星に搭載されたセンサーの視野に海水が混在していると、海水と海洋を区別しにくいからである。ただ技術革新とともに海水厚を推定するセンサーが今は打ち上げられている。このセンサーは、測定の基準である準拠楕円体からの海面までの距離と海水までの距離の双方を計測することで、海面から浮き出ている海水の高さ（フリーボードと呼ぶ）を求め、このフリーボードから海水の厚さを推定している。海水厚推定は概ね成功しており、これは海面の高さを正確に計測できていることを意味している。海面の高さは、海洋の流れを算出する際に必須であり、筆者はこのデータから両極海の海洋循環を推定している。学生時代は「氷の存在が大嫌い」だったにもかかわらず、今は「氷があつてデータが今までよくわかっていなかった」ことを逆手にとって、知られていない海洋循環をあぶり出している（第9図）。誰も知らない海洋循環とその変動を見出したときはやはり面白い。ちなみに北極海でも南極海でも、大部分の海水は沿岸域で形成されるので、海水には沿岸域の栄養塩や植物プランクトンを含んでいる。理想論では海水は海水の真水部分が凍ったものであるが、実際にはできて1年程度の海水はしょっぱく、つまり海水を内包している。この海水は沖合に運ばれて融解すると、内包していた物質を沖合に放出する。海水融解域は海洋生態系を支

える植物プランクトンの生産量が大きい場所である。海洋生物学者にとっては、栄養塩などの運び屋である海水がどこに行くのか、なぜここに運ばれるのかということが気になる。このとき、私が導出している海洋循環場が重要視されることがある。また、もともとは海洋生態系に関する研究の近くにいたこともあつて、こちらから観測点を提案するということもある。水の三相が揃う両極海のシステムは複雑ではあるが、このような形で楽しく真剣に現在進行形で共同研究を進めている。

4. 地球環境・海洋環境の変化への対策の困難さ

本稿では、地球温暖化の影響について、IPCCの報告書や北極海・南極海の事例を紹介してきたが、一言で地球温暖化といっても、その影響が多岐にわたることはおわかりいただけたと思う。しかも本稿で紹介した事例は、海洋学の側面から見た地球温暖化の影響のほんの一部である。少なくとも1.2節で述べたように「人為起源CO₂排出量の抑制」によって、海洋を含む地球環境の変化を抑えることはできるが、2100年には産業革命前より全球平均気温が1.5℃高い世界がおそらく待ち受けている。しかし、この「人為起源CO₂排出量の抑制」ですら、世界の足並みは揃っていない。米国は、どうあがいても温暖化するのであれば、経済成長を取り、パリ協定から離脱するという選択をした。温暖化対策で国内総生産3兆ドルと雇用270万人を2040年までに失うという試算に基づいているためである。また、日本は昨年のCOP25で、石炭火力発電からの脱却や温室効果ガスの削減目標を引き上げる意思を示せず、「化石賞」を2度も受賞した。化石燃料に頼ってきた経済活動があつて今があるという現状を鑑みて、「経済成長」と「人為起源CO₂排出量の抑制」を天秤にかけてしまうことは仕方のないことであろう。また経済成長という面では、地球温暖化によるメリットを考える人達もいる。例えば、海水減少に伴う北極海の商業利用、いわゆる北極海航路の活

用である。北極海航路にはベーリング海峡からロシア沿岸・バレンツ海を通る北東航路と、ベーリング海峡からアラスカ沿岸・カナダ多島海を通る北西航路がある。特にヨーロッパ・東アジア間の海上輸送では、スエズ運河航路の代替ルートとして、4割距離が短く、海賊問題を回避できる北東航路が注目されている。現状では開通期間は1カ月程度であるが、今後この期間は地球温暖化によって拡大する可能性がある。さらに世の中で挙げられている地球温暖化のメリットには、極域・亜寒帯域の農業での生産性向上や、温暖な冬による死者の減少、また次に来るとされる氷河期の抑制などである。もちろん、農業に関しては地球温暖化によるデメリットがあることは1.3節で述べた通りであるし、温暖化の作用・反作用は様々な側面で現れるだろう。

地球温暖化問題は、国家レベルを超えた全球の課題である上に時間スケールが長い。個々人にとっては「自分が直面する問題」と捉えにくく、漠然とした危機感をもっている人が大半だと思う。

ここで必要なのは、全球レベルの遠い話とは思わずに、ある程度の身を切る改革を断行してでも、「孫からその先までの幸せになれる持続可能な社会（例えば、低炭素社会）を構築したい」という意思であろう。人間社会を含む地球システムすべてに影響を及ぼす地球温暖化問題の解決については、よほどの技術革新がない限り、万人が満足する解を得ることはほぼ不可能である。しかし、経済成長を無視できない我々が、グretaさんのような人たちの声を一蹴せずに向き合える社会を醸成できるかどうか？ここに対策の困難さが集約されている。

本稿では、地球温暖化が両極海を含む海洋環境に与える影響について紹介したが、まだまだ研究すべき課題は山積している。本稿が読者の皆さんにとって、地球温暖化のみならず、海洋を含む地球環境の課題を身近なものにすることができれば、そして今後少しでも地球環境研究に目を向けていただくための一助となれば幸いである。

参考文献

- 1) Arrhenius, S. (1896), On the Influence of Carbonic Acid in the Air Upon the Temperature of the Ground, *Philosophical Magazine*, **41**, 237-76.
- 2) Callendar, G. S. (1938), The Artificial Production of Carbon Dioxide and Its Influence on Climate, *Quarterly J. Royal Meteorological Society*, **64**, 223-40.
- 3) DeVries, T. (2014), The oceanic anthropogenic CO₂ sink: Storage, air-sea fluxes, and transports over the industrial era, *Global Biogeochemical Cycles*, **28(7)**:631-647.
- 4) England, M. H., S. McGregor, P. Spence, G. A. Meehl, A. Timmermann, W. Cai, A. S. Gupta, M. J. McPhaden, A. Purich and A. Santoso (2014), Recent intensification of wind-driven circulation in the Pacific and the ongoing warming hiatus. *Nature Climate Change*, **4(3)**, 222-227.
- 5) Fourier, J. (1824), Remarques Générales sur les Températures Du Globe Terrestre et des Espaces Planétaires. *Annales de Chimie et de Physique* **27**: 136-67. Translation by Ebeneser Burgess, "General Remarks on the Temperature of the Earth and Outer Space," *American Journal of Science* **32**: 1-20 (1837).
- 6) Fujiwara A., T. Hirawake, K. Suzuki, S. -I. Saitoh (2011), Remote sensing of size structure of phytoplankton communities using optical properties of the Chukchi and Bering Sea shelf region, *Biogeoscience*, **8(12)** 3567-3580.
- 7) Fujiwara, A., T. Hirawake, K. Suzuki, I. Imai, and S.-I. Saitoh (2014), Timing of sea ice retreat can alter phytoplankton community structure in the western Arctic Ocean, *Biogeosciences*, **11**, 1705-1716, <https://doi.org/10.5194/bg-11-1705-2014>.
- 8) Inoue J, M. E. Hori and K. Takaya (2012), The role of Barents Sea-ice in the wintertime cyclone track and emergence of a warm-Arctic cold-Siberian anomaly *Journal of Climate*, **25** 2561-8.
- 9) IPCC (2013), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, In T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley, eds. Cambridge, Cambridge University Press, 1535pp, doi:10.1017/CBO9781107415324.

- 10) Kashiwase, H., K. I. Ohshima, S. Nihashi, and H. Eicken (2017), Evidence for ice-ocean albedo feedback in the Arctic Ocean shifting to a seasonal icezone. *ScientificReports*, 7:8170, DOI:10.1038/s41598-017-08467-z.
- 11) Khatiwala, S., F. Primeau and T. Hall (2009), Reconstruction of the history of anthropogenic CO₂ concentrations in the ocean. *Nature* **462**, 346–349 (2009) doi:10.1038/nature08526.
- 12) Keeling, C. D. (1960), The Concentration and Isotopic Abundances of Carbon Dioxide in the Atmosphere, *Tellus* **12**: 200-203.
- 13) Kitade, Y., K. Shimada, T. Tamura, G. D. Williams, S. Aoki, Y. Fukamachi, F. Roquet, M. Hindell, S. Ushio, K. I. Ohshima (2014), Antarctic Bottom Water production from the Vincennes Bay Polynya, East Antarctica, *Geophysical Research Letter*, doi:10.1002/2014GL059971.
- 14) Mann, M. E., R. S. Bradley, M. K. Hughes (1999), Northern hemisphere temperatures during the past millennium: Inferences, uncertainties, and limitations, *Geophysical Research Letters*, **26 (6)**: 759–762.
- 15) Mitchell, J. Murray, Jr. (1961), Recent Secular Changes of Global Temperature, *Annals of the New York Academy of Sciences*, **95**, 235-50.
- 16) Mizobata, K., K. Shimada, S.-I. Saitoh and J. Wang, Estimation of Heat Flux through the Eastern Bering Strait, *Journal of Oceanography*, Vol. 66, No. **3**, 405-424, 2010.
- 17) Mizobata K., E. Watanabe and N. Kimura, Wintertime variability of the Beaufort Gyre in the Arctic Ocean derived from CryoSat-2/SIRAL observations, *Journal of Geophysical Research-Oceans*, doi:10.1002/2015JC01121.
- 18) Purkey, S. G. and G. C. Johnson (2013), Antarctic Bottom Water warming and freshening: contributions to sea level rise, ocean freshwater budgets and global heat gain. *Journal of Climate*, **26**, 6015-6122.
- 19) Rignot, E., S. Jacobs, J. Mouginot, B. Scheuchl (2013), Ice-Shelf Melting Around Antarctica, *Science*, Vol. 341, Issue 6143, pp. 266-270, DOI: 10.1126/science.1235798.
- 20) Schiermeier, Q. (2008), Marine dead zones set to expand rapidly, *Nature*, published online 14th Nov., 2008, doi:10.1038/news.2008.1230.
- 21) Shimada, K., T. Kamoshida, M. Itoh, S. Nishino, E. Carmack, F. McLaughlin, S. Zimmerman, and A. Proshutinsky (2006), Pacific Ocean Inflow: influence on catastrophic reduction of sea ice cover in the Arctic Ocean, *Geophysical Research Letters*, Vol. 33, L08605, doi:10.1029/2005GL025624.
- 22) Tachibana, Y., K. K. Komatsu, V. A. Alexeev, L. Cai and Y. Ando (2019), Warm hole in Pacific Arctic sea ice cover forced mid-latitude Northern Hemisphere cooling during winter 2017–18. *Scientific Reports*, 9, 5567, doi:10.1038/s41598-019-41682-4
- 23) Tyndall, J. (1863b), On the Relation of Radiant Heat to Aqueous Vapor, *Philosophical Magazine* ser. 4, **26**, 30-54.
- 24) Watanabe M., H. Shiogama, H. Tatebe, M. Hayashi, M. Ishii and M. Kimoto (2014), Contribution of natural decadal variability to global warming acceleration and hiatus, *Nature Climate Change*, **4**, 893-897.